

Zastosowania sygnałów SSVEP w interfejsach mózg-komputer - wielowymiarowe podejście do interakcji człowiek-komputer

Adrianna Piszcz

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Informatyki
Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz
e-mail: adrianna.piszcz@ukw.edu.pl

Streszczenie: Celem pracy jest przedstawienie różnorodnych zastosowań sygnałów SSVEP (Steady-State Visually Evoked Potentials) w interfejsach mózg-komputer (BCI). Interfejsy mózg-komputer oparte o SSVEP umożliwiają intuicyjne i wszechstronne sterowanie, otwierając nowe możliwości w takich dziedzinach jak obsługa urządzeń wspomagających, wirtualna i rozszerzona rzeczywistość, sterowanie inteligentnymi domami, gry i rozrywka. Omówione zostaną metody akwizycji i przetwarzania sygnałów EEG, algorytmy klasyfikacji oraz ich zastosowanie w różnych systemach. Wyniki badań wskazują na efektywność technologii SSVEP w dostarczaniu niezawodnych i precyzyjnych interakcji, co czyni ją kluczowym elementem w rozwoju nowoczesnych interfejsów użytkownika oraz systemów wspierających.

Słowa kluczowe: interfejs mózg-komputer; SSVEP; VR; AR; interakcja człowiek-komputer

Applications of SSVEP signals in Brain-Computer Interfaces - multidimensional approach To Human-Computer Interaction

Abstract: This work aims to showcase the diverse applications of SSVEP (Steady-State Visually Evoked Potentials) signals in brain-computer interfaces (BCI). BCIs based on SSVEP allow for intuitive and versatile control, opening new possibilities in areas like assistive device control, virtual and augmented reality, smart home control, gaming, and entertainment. The paper will discuss methods for acquiring and processing EEG signals, classification algorithms, and their application in various systems. Research results demonstrate the effectiveness of SSVEP technology in providing reliable and precise interactions, making it a key element in the development of modern user interfaces and support systems.

Keywords: brain-computer interface; SSVEP; VR; AR; human-computer interaction

1. Wprowadzenie

Współczesne społeczeństwo staje przed coraz bardziej złożonymi wyzwaniami w zakresie przetwarzania informacji i zarządzania wieloma zadaniami jednocześnie. Coraz więcej aspektów naszego życia przenosi się do sfery cyfrowej, a interakcja z komputerami staje się wszechobecna. W tym kontekście naturalnym jest dążenie do minimalizowania barier w komunikacji człowiek-komputer i poszukiwanie bardziej intuicyjnych, efektywnych i immersyjnych metod interakcji. Interfejsy mózg-komputer zyskują na znaczeniu jako obiecująca technologia, która może zrewolucjonizować sposób, w jaki komunikujemy się z maszynami. BCI oparte o sygnały elektroencefalograficzne pozwalają na

rejestrowanie aktywności mózgu i wykorzystanie jej do sterowania urządzeniami zewnętrznymi, otwierając drogę do interakcji opartej o nasze myśli i intencje [1,2,3].

2. Podstawy działania interfejsów mózg-komputer

Interfejs mózg-komputer (BCI) to bezpośrednia ścieżka komunikacji między mózgiem a urządzeniem zewnętrznym, która pozwala użytkownikowi na sterowanie lub interakcję z urządzeniem za pomocą aktywności neuronalnej. BCI to urządzenie, które pozwala ludziom komunikować się z komputerem wyłącznie za pomocą sygnałów EEG pobieranych z powierzchni głowy. Po odpowiedniej kalibracji użytkownik, korzystając z urządzenia i dedykowanego oprogramowania, jest w stanie sterować

komputerem w sposób podobny do używania myszy lub klawiatury. Działanie interfejsu mózg-komputer rozpoczyna się od zainicjowania przez użytkownika określonego zadania lub akcji. Może to obejmować wyobrażenie sobie ruchu, osiągnięcie określonego progu skupienia lub zaangażowanie w medytację. Następnie następuje pozyskiwanie i wstępna obróbka sygnałów mózgowych, która obejmuje usuwanie artefaktów z danych. Z przetworzonych sygnałów ekstrahowane są charakterystyczne cechy. Interfejsy mózg-komputer działają poprzez wykrywanie określonych wzorców aktywności mózgu i tłumaczenie ich na polecenia, które można wykorzystać do sterowania aplikacją komputerową lub urządzeniem zewnętrznym. Wolne potencjały korowe, rytmy sensomotoryczne i potencjały wywołane należą do głównych korelatów neuronalnych, które były wykorzystywane do obsługi BCI [4]. Te sygnały neuronalne odzwierciedlają różne aspekty aktywności mózgu i mogą być wykorzystywane do sterowania funkcjami interfejsu mózg-komputer. Na przykład wolne potencjały korowe to zmiany niskiej częstotliwości w aktywności elektrycznej mózgu, które można modulować stanem psychicznym użytkownika i wykorzystywać do sterowania BCI. Rytmy sensomotoryczne, które są oscylacjami w pasmach częstotliwości mu i beta nad korą sensomotoryczną, mogą być wykorzystywane do wykrywania wyobrażeń ruchowych i intencji. Z drugiej strony potencjały wywołane to odpowiedzi zsynchronizowane z czasem na określone zdarzenia sensoryczne, poznawcze lub motoryczne, które można wykorzystać w zastosowaniach BCI, takich jak systemy generowania tekstu oparte na P300. Wybór i integracja tych cech neuronalnych zależy od specyficznych wymagań i projektu systemu BCI w celu optymalizacji jego wydajności i użyteczności dla użytkownika końcowego. SSVEP to kolejny ważny i szeroko stosowany sygnał mózgowy w BCI, który reprezentuje reakcję mózgu na bodziec wizualny migoczący z określoną częstotliwością [5]. Ten potencjał wzbudzany wizualnie jest szeroko badany i wykazuje duży potencjał w różnych zastosowaniach BCI ze względu na wysoki stosunek sygnału do szumu, łatwość wykrywania i zdolność do wywoływania silnych odpowiedzi w mózgu. Podejście BCI oparte na SSVEP pozwala użytkownikom na sterowanie urządzeniami zewnętrznymi lub interfejsami komputerowymi poprzez skupienie uwagi wizualnej na migoczących bodźcach wizualnych, co wywołuje odpowiednie odpowiedzi specyficzne dla częstotliwości w aktywności elektrycznej mózgu, które z kolei można wykryć i przetłumaczyć na polecenia sterujące [6,7].

3. Sygnał EEG

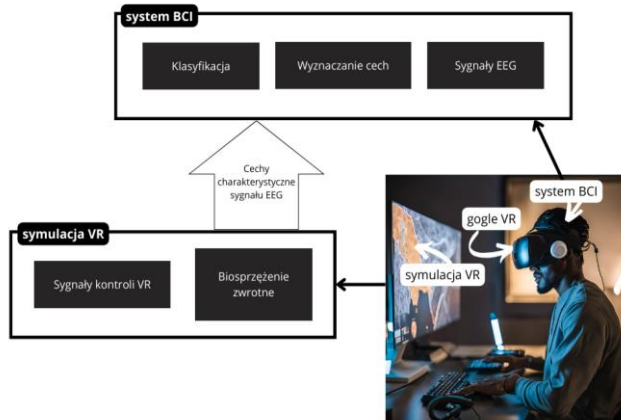
Sygnał elektroencefalograficzny reprezentuje potencjały elektryczne rejestrowane przez elektrody umieszczone na skórze głowy, które fluktuują ze względu na synchroniczną aktywność milionów neuronów w mózgu. Te fluktuacje potencjałów elektrycznych są spowodowane przepływami prądów jonowych związanych z procesami neuronalnymi, odzwierciedlając podstawową aktywność neuronalną w korze mózgowej [8]. Punkt styku elektrody z głową badanego odbiera sygnały elektryczne, które reprezentują zbiorczą aktywność wielu neuronów w obszarze mózgu, który jest monitorowany. Sygnały te nie ograniczają się do pojedynczego neuronu, ale odzwierciedlają zsynchronizowane wyładowania licznych neuronów zaangażowanych w procesy neuronalne, które są związane z konkretnym zadaniem poznawczym lub motorycznym wykonywanym przez badanego. Elektroencefalograf to system złożony z wielu elementów elektronicznych zaprojektowanych do pozyskiwania, wzmacniania i przesyłania sygnałów elektrycznych, które reprezentują aktywność neuronalną mózgu. Jednak warunki, w których działa system EEG, mogą stanowić wyzwanie w dokładnym rejestrowaniu sygnałów o niskim napięciu ze względu na zastosowanie technik wzmacniania i przetwarzania sygnałów.

4. Wyniki

4.1. Wpływ immersji na BCI

Jednym z kluczowych aspektów skutecznej interakcji człowiek-komputer jest zapewnienie poczucia głębokiej immersji i zaangażowania użytkownika [9]. Kluczowe znaczenie mają tu sygnały neurofizjologiczne związane z percepcją wzrokową, w szczególności sygnały rezonansowe stanu ustalonego (ang. steady-state visual evoked potentials, SSVEP). Sygnały SSVEP generowane są w korze wzrokowej w odpowiedzi na bodźce migające z częstotliwością od 3,5 do 75 Hz, co pozwala na nieinwazyjne monitorowanie aktywności mózgu. Interfejsy BCI wykorzystujące SSVEP umożliwiają intuicyjne sterowanie poprzez skupianie wzroku na różnych bodźcach wizualnych, generując charakterystyczne sygnały, które mogą być klasyfikowane w czasie rzeczywistym. VR i AR stwarzają idealne warunki do wykorzystania SSVEP-BCI, ponieważ umożliwiają one całkowite zanurzenie użytkownika w wirtualnym środowisku, dostarczając kontrolowanej stymulacji wzrokowej [10].

Obrazek (Rysunek 1) przedstawia integrację systemu interfejsu mózg-komputer (BCI) z symulacją wirtualnej rzeczywistości (VR). System BCI przetwarza sygnały EEG, wyodrębniając ich cechy, które następnie sterują symulacją VR i zapewniają użytkownikowi biosprzężenie zwrotne poprzez gogle VR.



Rysunek 1. Przepływ informacji w systemie BCI-VR.

Ponadto, SSVEP-BCI mogą być zintegrowane z różnymi aplikacjami interaktywnych mediów, grami czy urządzeniami do sterowania inteligentnym domem, znacznie zwiększając poziom zaangażowania i efektywność interakcji [11].

Wyniki badań wskazują, że środowiska wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości skutecznie stymulują powstawanie silnych sygnałów SSVEP, co umożliwia opracowanie niezawodnych i intuicyjnych interfejsów człowiek-komputer. Ponadto, stwierdzono, że bodźce 3D wywołują odmienne charakterystyki sygnałów SSVEP w porównaniu z bodźcami 2D, co może zostać wykorzystane do dalszej poprawy wydajności i użyteczności systemów BCI opartych na SSVEP [6,7]. Odkrycia te podkreślają znaczenie zastosowania zaawansowanych technologii wizualnych, takich jak wirtualna i rozszerzona rzeczywistość, w celu zwiększenia zaangażowania użytkowników i wykorzystania naturalnych reakcji mózgu do sterowania interfejsami człowiek-komputer.

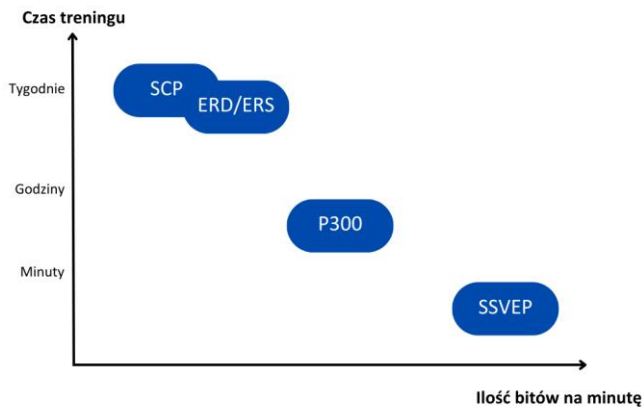
Chociaż integracja wirtualnej rzeczywistości z interfejsami mózg-komputer może stwarzać pewne wyzwania, istnieje również znaczące korzyści, które warto wziąć pod uwagę. Badania wskazują, że VR może w rzeczywistości poprawiać wydajność zadań i koncentrację użytkowników podczas interakcji z BCI [12]. Środowiska wirtualne dostarczają kontrolowanej stymulacji wzrokowej, co generuje wyraźniejsze i bardziej charakterystyczne wzorce SSVEP, ułatwiając ich detekcję i klasyfikację. Co więcej,

immersyjny charakter VR może zwiększać zaangażowanie i motywację użytkowników, wpływając pozytywnie na zdolność do efektywnego modulowania aktywności mózgu. Chociaż kompatybilność techniczna może stanowić wyzwanie, postęp w tej dziedzinie powinien umożliwić integrację systemów VR i BCI, zwiększając ogólną wydajność i atrakcyjność tych interfejsów. Dlatego też dalsze badania nad tą synergią są kluczowe, aby w pełni wykorzystać potencjał wirtualnej rzeczywistości w usprawnianiu interakcji człowiek-komputer opartych na sygnałach mózgowych.

4.2. Wzorce EEG w interfejsach mózg-komputer

Interfejsy mózg-komputer wykorzystują różnorodne wzorce elektroencefalografii do komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi (Rysunek 2). Wśród nich wyróżniamy:

- **Wolne potencjały korowe:** Są to świadomie generowane zmiany potencjału o niskiej częstotliwości (1-2 Hz) i czasie trwania od 300 ms do kilku sekund. Wyróżnia się potencjały SCP pozytywne i negatywne, generowane przez aktywację lub dezaktywację kory mózgowej. Metoda ta wymaga długiego treningu z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego, aby nauczyć się świadomego wywoływania potencjałów. SCP charakteryzuje się niską szybkością przesyłania informacji, około 10 bitów na minutę (jedno słowo na minutę).
- **Potencjały związane z ruchem (ERD/ERS):** Są to zmiany mocy sygnału EEG w określonych pasmach częstotliwości, występujące podczas wykonywania zadań motorycznych lub wyobrażenia sobie ruchu. Metoda ta jest szybsza w przesyłaniu informacji niż SCP i osiąga prędkość kilku znaków na minutę w aplikacjach do pisania.
- **Potencjały wywołane:** Są to potencjały o częstotliwości od 0,5 do 15 Hz, które powstają w wyniku bodźca wzrokowego, słuchowego lub czuciowego. Najczęściej wykorzystywany jest potencjał P300, związany z reakcją osoby na oczekiwany, rzadki bodziec. Pozytywny potencjał P300 ma amplitudę od 5 do 10 μV i pojawia się około 300 ms po bodźcu. Metoda ta jest stosunkowo szybka i łatwa w użyciu, ale wymaga od użytkownika skupienia uwagi na bodźcu.
- **Wzrokowe potencjały wywołane o stanie ustalonym (SSVEP):** Są to sygnały o określonej częstotliwości, które pojawiają się w mózgu w odpowiedzi na migające bodźce wzrokowe o tej samej częstotliwości. Metoda ta charakteryzuje się wysokim stosunkiem sygnału do szumu, co ułatwia jego detekcję i klasyfikację.



Rysunek 2. Porównanie przedstawionych wzorców EEG.

W porównaniu do innych metod opartych o EEG, SSVEP wyróżnia się kilkoma istotnymi zaletami: wysokim stosunkiem sygnału do szumu, krótkim czasem treningu i możliwością tworzenia wielowymiarowych interfejsów [2,13]. Te cechy sprawiają, że SSVEP stanowi atrakcyjną i wszechstronną metodę dla szerokiej gamy zastosowań BCI, w tym dla osób z niepełnosprawnościami, w rozrywce i w przemyśle [14,15].

4.3. Zastosowania BCI opartych na SSVEP

Systemy BCI oparte na SSVEP znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, od rehabilitacji medycznej po interakcję człowiek-komputer w grach i rozrywce [16]. W aplikacjach medycznych i rehabilitacyjnych interfejsy SSVEP-BCI umożliwiają osobom niepełnosprawnym komunikację i sterowanie urządzeniami asystującymi, takimi jak elektryczne wózki inwalidzkie czy protezy sterowane myślami. Ponadto, BCI można wykorzystywać do monitorowania i diagnozy zaburzeń neurologicznych, oceny stanu uwagi i koncentracji oraz wspomagania terapii poznawczo-behawioralnej [17,18].

Interfejsy SSVEP-BCI są również z powodzeniem wykorzystywane w dziedzinie rozrywki i interaktywnych multimedialnych. Umożliwiają one użytkownikom kontrolowanie gier komputerowych, systemów nawigacji wirtualnej rzeczywistości oraz inteligentnych systemów domowych za pomocą sygnałów mózgowych, tworząc nowe formy immersyjnej interakcji człowiek-komputer. Ponadto, BCI oparte na SSVEP mogą być wykorzystywane w automatyzacji i sterowaniu, na przykład do pilotowania

bezzałogowych pojazdów lub sterowania przemysłowymi układami robotycznymi [16,19].

5. Dyskusja

Interfejsy mózg-komputer oparte na sygnałach SSVEP otwierają szerokie spektrum możliwości dla wzbogacenia interakcji człowiek-komputer. Wykorzystanie immersyjnych środowisk wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości może jeszcze bardziej zwiększyć efektywność i atrakcyjność tych systemów BCI poprzez dostarczanie kontrolowanej stymulacji wzrokowej, a co za tym idzie, generowanie wyraźniejszych i bardziej charakterystycznych wzorców SSVEP.

5.1. Rozwiązania istniejące na rynku

Przykładem istniejącego rozwiązania SSVEP-BCI jest system do sterowania elektrycznym wózkiem inwalidzkim, opracowany w Chinach [14]. System ten wykorzystuje elektrody EEG do rejestracji sygnałów SSVEP, a następnie analizuje częstotliwość dominującą w tych sygnałach w celu określenia komendy sterującej do napędzania wózka.

Innym przykładem jest zbiór danych sygnałów EEG pochodzących z jednorotorowego systemu SSVEP-BCI, opracowany przez niemiecki zespół badawczy kierowany przez Zhu [20]. Zbiór ten może stanowić wartościowy punkt wyjścia do projektowania i testowania nowych algorytmów uczenia maszynowego dedykowanych interfejsom BCI opartym na sygnałach SSVEP.

Interfejsy mózg-komputer wykorzystujące sygnały SSVEP otwierają wiele perspektywicznych zastosowań, od rehabilitacji medycznej po interaktywne środowiska rozrywkowe i automatyzację przemysłową. Dotychczasowe badania wskazują, że dalszy rozwój tych technologii, m.in. w kierunku przyjaznych dla użytkownika aplikacji mobilnych i wearable, będzie prowadził do ich coraz szerszego rozpowszechnienia i akceptacji społecznej.

5.2. Propozycja wykorzystania wyników pracy

Opracowane w tej pracy wnioski mogą zostać wykorzystane do projektowania nowoczesnych, intuicyjnych interfejsów człowiek-komputer, które łączą zaawansowane technologie wizualne, takie jak VR i AR, z niezawodnymi i wydajnymi systemami BCI opartymi na SSVEP. Takie zintegrowane rozwiązania znajdują szerokie zastosowanie w medycynie, rehabilitacji, rozrywce, automatyzacji domowej i przemysłowej, umożliwiając osobom z różnymi rodzajami

niepełnosprawności bardziej naturalne i intuicyjne sterowanie urządzeniami. Ponadto, badania nad wzorcami SSVEP w immersyjnych środowiskach wirtualnych i rozszerzonych mogą dostarczyć nowych informacji na temat mechanizmów przetwarzania bodźców wzrokowych w mózgu, co z kolei może przyczynić się do dalszego rozwoju neuronauk i informatyki biomedycznej [13,17,21].

5.3. Ograniczenia

Pomimo potencjalnych korzyści, zastosowanie interfejsów mózg-komputer posiada również pewne ograniczenia i wyzwania, które wymagają dalszych badań. Należy rozwiązać problemy związane z obciążeniem poznawczym użytkownika, komfortem korzystania, a także kwestie prywatności i bezpieczeństwa [16]. Konieczne są również prace nad zindywidualizowanymi algorytmami przetwarzania i klasyfikacji sygnałów SSVEP w celu zwiększenia niezawodności tych systemów. Etyka i wpływ technologii BCI na społeczeństwo również wymagają dogłębnej analizy [19]. Integracja systemów BCI-VR (interfejs mózg-komputer i rzeczywistość wirtualna) wiąże się z kluczowymi wyzwaniami w zakresie ochrony danych i etyki. Ze względu na wrażliwy charakter danych neuronowych, konieczne jest wprowadzenie zaawansowanych zabezpieczeń cybernetycznych, aby zapobiec ich nieautoryzowanemu dostępowi, naruszeniom prywatności lub złośliwemu wykorzystaniu. Równocześnie długoterminowy wpływ BCI na funkcje poznawcze wciąż pozostaje otwartym obszarem badań.

Długotrwałe stosowanie systemów VR-BCI może wpływać na percepcję i stany emocjonalne użytkowników, a nawet prowadzić do uzależnienia lub nadmiernego polegania na tej technologii. Wirtualne doświadczenia mogą zacierać granice między rzeczywistością a światem cyfrowym, co może negatywnie wpływać na zdrowie psychiczne i procesy decyzyjne użytkowników.

Kolejnym wyzwaniem jest zapewnienie równego dostępu do tej technologii oraz przeciwdziałanie potencjalnym uprzedzeniom w projektowaniu systemów, które mogłyby pogłębiać istniejące nierówności społeczne. Wraz z rozwojem technologii istnieje ryzyko, że wytyczne etyczne i regulacje prawne nie nadążą za tempem zmian, co zwiększa potencjał ich niewłaściwego wykorzystania. Opracowanie kompleksowych wytycznych i protokołów dla bezpiecznego i etycznego stosowania systemów VR-BCI będzie kluczowe dla ich odpowiedzialnego rozwoju.

5.4. Kierunki dalszych badań

Przyszłe badania nad SSVEP-BCI powinny skupić się na opracowaniu nowych algorytmów przetwarzania sygnałów i metod klasyfikacji pozwalających na zwiększenie szybkości i dokładności działania tych systemów, przy jednoczesnej redukcji czasu treningu i obciążenia użytkownika. Ponadto, istotne jest dalsze badanie wpływu zaawansowanych technologii wizualnych, takich jak wirtualna i rozszerzona rzeczywistość, na charakterystyki sygnałów SSVEP w celu opracowania jeszcze bardziej efektywnych i intuicyjnych interfejsów człowiek-komputer. Wykorzystanie nowych technologii, takich jak rzeczywistość rozszerzona i czujniki noszone, może dodatkowo poprawić wrażenia użytkownika i rozszerzyć zastosowania systemów BCI-VR. Należy skupić się również na poprawie wszechstronności i dostępności systemów BCI-VR. Przyjęcie znormalizowanych protokołów, ulepszenie przyjaznych dla użytkownika interfejsów i poszukiwanie opłacalnych rozwiązań sprzętowych może poszerzyć zasięg i zastosowanie tych zintegrowanych technologii.

6. Wnioski

Przedstawiona w pracy analiza oraz przytoczone wyniki badań podkreślają znaczący potencjał sygnałów SSVEP w interfejsach mózg-komputer. Zastosowanie tych sygnałów otwiera nowe możliwości w projektowaniu nowoczesnych, intuicyjnych i immersyjnych systemów interakcji człowiek-komputer. Dalszy rozwój SSVEP-BCI, optymalizacja algorytmów klasyfikacji oraz integracja z zaawansowanymi technologiami, takimi jak VR/AR, mogą zapewnić bardziej naturalne i efektywne metody sterowania, mierzenia i interakcji, których potrzebuje współczesne społeczeństwo. Interfejsy mózg-komputer oparte na sygnałach SSVEP to dynamicznie rozwijająca się dziedzina, oferująca szerokie zastosowania w wielu obszarach, od rehabilitacji medycznej i wsparcia osób z niepełnosprawnościami, przez interaktywne środowiska rozrywkowe, po automatyzację i kontrolę w przemyśle.

Literatura

1. Yadav H., Maini S. Electroencephalogram based brain-computer interface: Applications, challenges, and opportunities. Springer Science+Business Media. 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15653-x.
2. Peksa J., Mamchur D. State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology. 2023, <https://www.mdpi.com/1424->

- 8220/23/13/6001/pdf?version=1687945239. Dostęp 11.11.2024.
3. Zhu D., Bieger J., Garcia-Molina G., Aarts R.M. A Survey of Stimulation Methods Used in SSVEP-Based BCIs. *Comput Intell Neurosci.* 2010, 1. doi: 10.1155/2010/702357.
 4. Zhang Y. Mechanism Research and Application of Brain-computer Interface. 2020 doi: 10.1145/3429889.3430085.
 5. Zhang Y., Xie S.Q., Wang H., Zhang Z. Data Analytics in Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interface: A Review. *IEEE Sens J.* 2020, 21(2), 1124. doi: 10.1109/jsen.2020.3017491.
 6. Liu H. et al. A comparative study of stereo-dependent SSVEP targets and their impact on VR-BCI performance. *Front Neurosci.* 2024. doi: 10.3389/fnins.2024.1367932.
 7. Niu L. et al. Effect of 3D paradigm synchronous motion for SSVEP-based hybrid BCI-VR system. 2023.
 8. Gu W., Yang B., Chang R. Machine Learning-based EEG Applications and Markets. Cornell University. 2022. doi: 10.48550/arxiv.2208.05144.
 9. Coulton P., Wylie C.G., Bamford W. Brain interaction for mobile games. 2011. doi: 10.1145/2181037.2181045.
 10. Gutiérrez-Martínez J., Mercado-Gutiérrez J.A., Carvajal-Gómez B.E., Rosas-Trigueros J.L., Contreras-Martinez A.E. Artificial Intelligence Algorithms in Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interfaces for Motor Rehabilitation Applications: Systematic Review and Future Directions. *Front Hum Neurosci.* 2021, 15. doi: 10.3389/fnhum.2021.772837.
 11. Piszcz A., Rojek I., Mikołajewski D. Impact of Virtual Reality on Brain-Computer Interface Performance in IoT Control—Review of Current State of Knowledge. *Multidiscip Digit Publ Inst.* 2024. doi: 10.3390/app142210541.
 12. Piszcz A. BCI w VR: imersja sposobem na sprawniejsze wykorzystywanie interfejsu mózg-komputer. *Studia i Materiały Informatyki Stosowanej.* 2021;13(1):5-10.
 13. Bonaci T., Herron J.A., Matlack C., Chizeck H.J. Securing the exocortex: A twenty-first century cybernetics challenge. 2014 Jun 01. doi: 10.1109/norbert.2014.6893912.
 14. Gu X. et al. EEG-Based Brain-Computer Interfaces (BCIs): A Survey of Recent Studies on Signal Sensing Technologies and Computational Intelligence Approaches and Their Applications. *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform.* 2021, 18(5), 1645. doi: 10.1109/tcbb.2021.3052811.
 15. Koudelková Z., Daňková Š., Filip M., Dabrovska M. The Possibility of Using BCI Applications in Physiotherapy. *EDP Sci.* 2019. doi: 10.1051/mateconf/201929201033.
 16. Maiseli B. et al. Brain Computer Interface: Future, Challenges, and Potential Threats. RELX Group (Netherlands). 2022. doi: 10.2139/ssrn.4073630.
 17. Luo W., Yin W., Liu Q., Qu Y. A hybrid brain-computer interface using motor imagery and SSVEP Based on convolutional neural network. 2023. doi: 10.1080/27706710.2023.2258938.
 18. Chen W., Chen S.K., Liu Y., Chen Y.J., Chen C. An Electric Wheelchair Manipulating System Using SSVEP-Based BCI System. *Multidiscip Digit Publ Inst.* 2022. doi: 10.3390/bios12100772.
 19. Acampora G., Trinchese P., Vitiello A. A dataset of EEG signals from a single-channel SSVEP-based brain computer interface. Elsevier BV. 2021. doi: 10.1016/j.dib.2021.106826.
 20. Zhu F, Jiang L, Dong G, Gao X, Wang Y. An Open Dataset for Wearable SSVEP-Based Brain-Computer Interfaces. *Multidiscip Digit Publ Inst.* 2021. doi: 10.3390/s21041256.
 21. Wai A.A.P. et al. Towards a Fast Steady-State Visual Evoked Potentials (SSVEP) Brain-Computer Interface (BCI). Cornell University. 2020. doi: 10.48550/arxiv.2002.01117.